

論文の内容の要旨

論文題目	近接覚を用いた反射動作に基づくハンド・アーム統合制御による把持
学位 申請者	小山 佳祐
<p>ロボットハンドによる把持・操作では、視覚と触覚の組み合わせが一般的に用いられる。しかしながら、ハンドと物体が近い位置関係にあるとき、視覚からは対象物が見えず、また、接触するまでは触覚センサは機能しないため、情報欠落が生じる。そこで、本論文では、近接覚を用いてハンド表面から物体の位置を直接センシングし、幾何学的な形状情報の検出や適切な把持位置に修正する手法を提案した。論文では、近接覚により多指多関節ハンドとアームを統合的に制御する反射的制御アーキテクチャを提案し、高速な把持位置・姿勢補正の動作を実現した。このアーキテクチャはセンサ出力により、直接ハンドの関節とアーム手先位置・姿勢を制御することから、応答速度が早いこと、物体ごとにソフトウェアの変更が不要であるという特徴を持つ。</p> <p>本論文は9章から構成され、その内容の要旨は以下のとおりである。</p> <p>第1章 緒言 本章では、本研究を行う背景を述べ、視覚、触覚を用いて未知物体を把持する際に生じる物体近傍での情報欠落の問題と、接触力に依存する把持制御の問題点を整理し、近接覚によりこれらの問題点を解決できることを述べる。そして、近接覚と反射的制御アーキテクチャの全体像を示し、本論文の各章との関連について明確にする。</p> <p>第2章 ロボットアーキテクチャの変遷と分類 本章では、本論文で提案する統合制御方式の特徴や位置づけを明確にするためにロボットアーキテクチャの変遷を述べ、分類と比較を行う。そして、従来の近接覚・触覚を用いた制御では、平行グリップ等の低自由度のハンドのみを対象としているのに対し、本論文では多自由度のハンドとアームの統合制御を可能としている点が異なることを述べ、本論文の新規性と有用性を明確にする。</p> <p>第3章 指先部近接覚センサの設計 本章では、指先姿勢、距離の同時制御に適したセンサ特性とするための素子配置設計について述べる。具体的には、指先に実装する近接覚センサの素子配置角度や間隔を調整することで、物体面の傾き検出感度の向上と、指先姿勢に依存しない距離計測特性を実現する。このための素子配置パラメータを考案し、光学シミュレーションにより、パラメータ調整によるセンサ出力特性変化を検証することで、適切な検出素子配置を決定する。</p>	

第4章 指先部近接覚センサによる傾き・距離検出特性

本章では、開発した指先部近接覚センサによる物体面の傾き・距離検出特性を実験により検証する。まず、標準反射板におけるセンサ出力特性から、素子配置パラメータ調整の効果を検証し、次に色、模様、材質、形状の異なる物体面の傾き・距離検出実験により、対象物表面での光の反射特性がセンサ出力に与える影響を明らかにする。

第5章 ハンド・アーム統合制御システム

本章では、近接覚センサ出力を基に、ハンドとアームを高速リアルタイム制御するためのシステムの構築を行う。まず、各ハードウェアと制御器の接続関係を明示し、ハンドとアームの外観と主な仕様、センサ計測回路の詳細について述べる。次に、複数の近接覚センサ間での光の干渉を防止するためのセンサLEDの点灯制御を紹介し、また、アームの運動学的な特異点近傍での制御について説明する。以上により、ハンドとアームを安定かつ高速に制御可能なシステムを構成する。

第6章 プリグラスプ制御

本章では、指先部近接覚センサの出力に基づき、物体形状に倣って指先配置を調整するための制御方式について説明する。センサ出力を目標値として直接、関節角度を駆動する反射型制御を提案し、実験により指先と物体の初期位置を変化させた際の応答特性や収束位置等を検証する。なお、ここでは物体表面の光の反射率は既知として制御目標値を設定することとし、未知反射率の物体への適用を可能とする制御方式は次章で述べる。

第7章 物体表面の反射率によらない把持制御

本章では、面の反射率が未知の対象物に対する2つの把持制御について述べる。まず、アクティブセンシングによるセンサ出力の補正原理について説明する。次に、反射率推定により指先と物体面とを一定距離に配置し、全指同時接触を達成する手法について述べる。反射率推定実験の結果および、反射率の異なる対象物に対する把持実験の結果を説明する。次に、鳥などが飛行制御の際に用いる衝突までの残り時間推定(Time-to-contact)と呼ばれる生態学的知見を利用した指先の速度制御について述べる。まず、視覚情報から衝突までの残り時間を推定する仕組みについて説明し、近接覚と把持制御へと展開する。近接覚から衝突までの残り時間を推定した実験結果を述べ、把持実験の結果を述べる。

第8章 ハンドとアームの同時制御

本章では、物体形状に倣うハンド各指の制御に加えて、さらにアーム手先位置・姿勢も同時に調整する反射型制御を導入することで、ハンドとアームの統合制御方式を実現する。この方式では、ハンドとアームの制御は独立・並列して実行される。また、ハンド関節角度とアーム手先位置・姿勢が相互に作用することで、ハンドとアームの協調動作による把持位置・姿勢修正を可能としている。実験では、テーブル面に置かれた対象物への把持位置・姿勢修正や、人が手で持ってランダムに移動させる物体への追従可能性を実験により検証した。

第9章 結論と今後の展望

本章では、本論文の成果、結論をまとめ、今後の課題、展望について述べている。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 小山 佳祐

審査委員主査 明 愛国

委員 下条 誠

委員 横井 浩史

委員 金子 正秀

委員 田中 一男

委員 長井 隆行

ロボットハンドによる把持・操作では、視覚と触覚の組み合わせが一般的に用いられる。しかしながら、ハンドと物体が近い位置関係にあるとき、視覚からは対象物が見えず、また、接触するまでは触覚センサは機能しないため、情報欠落が生じる。そこで、本論文では、近接覚を用いてハンド表面から物体の位置を直接センシングし、幾何学的な形状情報の検出や適切な把持位置に修正する手法を提案した。論文では、近接覚により多指多関節ハンドとアームを統合的に制御する反射的制御アーキテクチャを提案し、高速な把持位置・姿勢補正の動作を実現した。このアーキテクチャはセンサ出力により、直接ハンドの関節とアーム手先位置・姿勢を制御することから、応答速度が早いこと、物体ごとにソフトウェアの変更が不要であるという特徴を持つ。本論文は9章から構成され、その内容の要旨は以下のとおりである。

第1章緒言：本研究を行う背景を述べ、視覚、触覚を用いて未知物体を把持する際に生じる物体近傍での情報欠落の問題と、接触力に依存する把持制御の問題点を整理し、近接覚によりこれらの問題点を解決できることを述べる。そして、近接覚と反射的制御アーキテクチャの全体像を示し、本論文の各章との関連について明確にする。

第2章ロボットアーキテクチャの変遷と分類：本論文で提案する統合制御方式の特徴や位置づけを明確にするためにロボットアーキテクチャの変遷を述べ、分類と比較を行う。そして、従来の近接覚・触覚を用いた制御では、低自由度のハンドのみを対象としているのに対し、本論文では多自由度のハンドとアームの統合制御を可能としている点が異なることを述べ、本論文の新規性と有用性を明確にする。

第3章指先部近接覚センサの設計：指先姿勢、距離の同時制御に適したセンサ特性とするための素子配置設計について述べる。具体的には、指先に実装する近接覚センサの素子配置角度や間隔を調整することで、物体面の傾き検出感度の向上と、指先姿勢に依存しない距離計測特性を実現する。このための素子配置パラメータを考案し、光学シミュレーションにより、パラメータ調整によるセンサ出力特性変化を検証することで、適切な検出素子配置を決定する。

第4章指先部近接覚センサによる傾き・距離検出特性：開発した指先部近接覚センサによる物体面の傾き・距離検出特性を実験により検証する。まず、標準反射板におけるセンサ出力特性から、素子配置パラメータ調整の効果を検証し、次に色、模様、材質、形状の異なる物体面の傾き・距離検出実験により、対象物表面での光の反射特性がセンサ出力に与える影響を明らかにする。

第5章ハンド・アーム統合制御システム：近接覚センサ出力を基に、ハンドとアームを高速リアルタイム制御するためのシステムの構築を行う。まず、各ハードウェアと制御器の接続関係を明示し、ハンドとアームの外観と主な仕様、センサ計測回路の詳細について述べる。次に、複数の近接覚センサ間での光の干渉を防止するためのセンサLEDの点灯制御を紹介し、また、アームの運動学的な特異点近傍での制御について説明する。以上により、ハンドとアームを安定かつ高速に制御可能なシステムを構成する。

第6章プリグリップ制御：指先部近接覚センサの出力に基づき、物体形状に倣って指先配置を調整するための制御方式について説明する。センサ出力を目標値として直接、関節角度を駆動する反射型制御を提案し、実験により指先と物体の初期位置を変化させた際の応答特性や収束位置等を検証する。なお、ここでは物体表面の光の反射率は既知として制御目標値を設定することとし、未知反射率の物体への適用を可能とする制御方式は次章で述べる。

第7章物体表面の反射率によらない把持制御：面の反射率が未知の対象物に対する2つの把持制御について述べる。まず、アクティブセンシングによるセンサ出力の補正原理について説明する。次に、反射率推定により指先と物体面とを一定距離に配置し、全指同時接触を達成する手法について述べる。反射率推定実験の結果および、反射率の異なる対象物に対する把持実験の結果を説明する。次に、鳥などが飛行制御の際に用いる衝突までの残り時間推定(Time-to-contact)と呼ばれる生態学的知見を利用した指先の速度制御について述べる。まず、視覚情報から衝突までの残り時間を推定する仕組みについて説明し、近接覚と把持制御へと展開する。近接覚から衝突までの残り時間を推定した実験結果を述べ、把持実験の結果を述べる。

第8章ハンドとアームの同時制御：物体形状に倣うハンド各指の制御に加えて、さらにアーム手先位置・姿勢も同時に調整する反射型制御を導入することで、ハンドとアームの統合制御方式を実現する。この方式では、ハンドとアームの制御は独立・並列して実行される。また、ハンド関節角度とアーム手先位置・姿勢が相互に作用することで、ハンドとアームの協調動作による把持位置・姿勢修正を可能としている。実験では、テーブル面に置かれた対象物への把持位置・姿勢修正や、人が手で持ってランダムに移動させる物体への追従可能性を実験により検証した。

第9章結論と今後の展望：本論文の成果、結論をまとめ、今後の課題、展望について述べている。

以上本論文では、ハンドに付与する新たな近接覚を開発、この近接覚情報を用いて各種物体形状の把持動作を生成できる反射動作アルゴリズムに基づいたハンド・アーム統合型制御系を考案し、各種物体把持を行うロボットハンドシステムを開発した。本システムは、自律的に物体の形状に倣い、その移動に自動追従した把持が可能である。また物体毎のソフトウェアが不要、高速動作が可能であり、更にハンドは指に取付けた近接覚センサと駆動モータを一対一で接続した独立した制御系であるため、ハンド内部にセンサと制御系を実装するコンパクトなハンドシステムが実現できるなど数多くの特徴を有する。

その新規性、独創性および有用性は高く、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。